

2 ヒンジ式プレキャストアーチカルバートの 継手性能確認実験に関する報告

久保田 伸一¹・大村 宏幸²・井上 晋³・木村 亮⁴・岸田 潔⁵

¹正会員 ジオスター株式会社 技術部 (〒355-0001 埼玉県東松山市岡字膳棚1871)
E-mail:kubota-siniti@geostr.co.jp

² 日本ゼニスパイプ株式会社 (〒101-0032 東京都千代田区岩本町1-10-15 TMMビル5F)

³正会員 大阪工業大学 教授 (〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮5-16-1)

⁴正会員 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 教授 (〒615-8540京都市西区京都大学桂)

⁵正会員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 准教授 (〒615-8540京都市西区京都大学桂)

2 ヒンジ式プレキャストアーチカルバートは道路トンネルなど、主に景観性や省力化、工期短縮を目的として数多く採用されている。特に大型の組立式構造では部材間に継手が存在し、継手をどのように評価するかが重要である。この2 ヒンジ式の場合はヒンジ構造として解析を行っている。しかしながら、これまで継手単体の回転性能を具体的な数値での確認はされていなかった。したがってこの度、改めて回転性能を実験により確認することとした。確認実験は継手部を直線梁部材にモデル化した実物大の供試体を用いた。供試体の継手部に曲げ荷重を発生させ、そこから読み取った荷重、変位、回転角などのデータから、継手の回転性能を算出した。また同時に、その数値を用いて、継手をヒンジと見なす現在の設計手法の妥当性確認も行った。

Key Words : 2-hinged arch culvert, connection, hinged, rotation performance, full-scale specimen

1. はじめに

近年、道路トンネルなどへ、現場での省力化および工期の短縮、景観への配慮などを目的としたプレキャスト工法が用いられるようになってきた。その中の1つの工法としてプレキャストアーチカルバートがある。

ピース数や接続形式などにより様々なアーチカルバートが存在するが、2 ヒンジ式プレキャストアーチカルバート（以降、2 ヒンジ式アーチ）はこの15年程の間に、国内で数多くの実績を築いており、最も施工実績が多い代表的な構造である。供用状態の写真を図-1に示す。

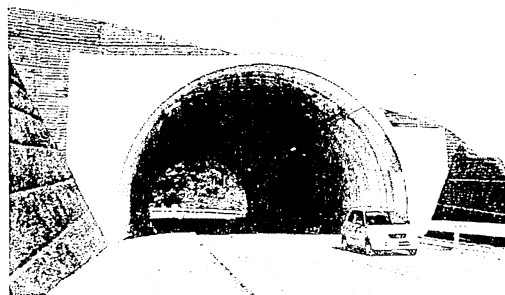


図-1 2 ヒンジ式アーチカルバート

プレキャスト部材は工場内での十分な品質管理下で生産されるために製品の品質が良いという利点がある反面、大型化に伴い工場から現場へ運搬する際

に、運搬可能なサイズに部材を分割する必要がある、その結果ピース間（部材間）に継手が生じ、その評価が問題となる。

2 ヒンジ式アーチの場合、継手はモーメントヒンジ構造と評価し解析を行っている。組立モデルでの模型実験などで継手に曲げが作用しないことの確認はしていたが¹⁾²⁾、継手単体での性能を具体的な数値としての確認は行っていなかった。よって、この度改めて確認をすることとした。

以上より本報告は、継手部の性能評価の基礎データとなる静的性能を実験的手法にて確認を行い、その報告およびヒンジモデルでの妥当性を検証したことをまとめたものである。具体的には、実大の継手部試験供試体に直接曲げ荷重を作用させ、載荷荷重、発生変位や回転角などの計測を行うことで、継手間の回転ばね定数を算出、またその定数を用いてフレーム計算を行い、継手がヒンジである場合と発生断面力の比較を行った。

2. 構造概要

2 ヒンジ式アーチは図-2に示すように、通常4分割のハーフプレキャスト構造となっており、上床版（ボールト）、左右側壁（サイドウォール）、下床版の場所打ちインバートで構成されている³⁾。ピース間の継手は回転を阻害しないようにナックル形状となっている。

開発元のフランスでは、サイドウォールの上にボルトを載せているだけであるが、国内ではオリジナルの規格として地震時の落橋防止対策として継手間へ曲がりボルト（M24(10.9)のハイテンションボルト）を挿入し、ボルトのシースへは腐食防止のためモルタルを充填している。継手部の詳細を図-3に、ボルト組立て状況写真を図-4に示す。なお、曲がりボルトへは継手の回転性能へ影響を与えないように、実際の施工でも手締め程度でボルトを締め、大きなトルクなどを作用させないようにしている。

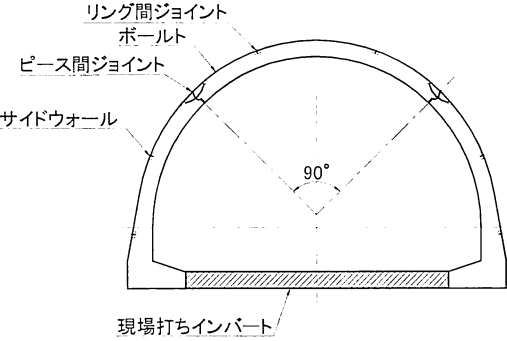


図-2 構造一般

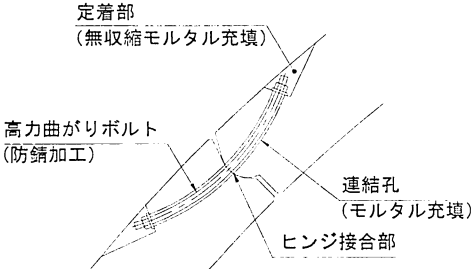


図-3 継手（ピース間ジョイント）構造

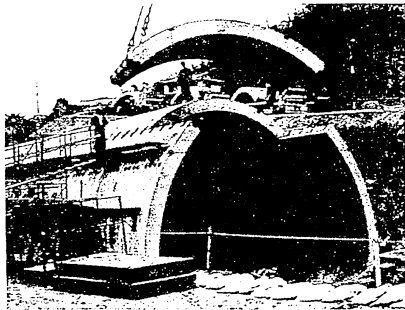


図-4 施工風景

3. 実験概要

(1) 全体の概要

実験は継手部の実物大供試体にて曲げ載荷を行い、その性能を確認した。実験全景を図-5に示す。

実験供試体は、過去に2ヒンジ式アーチカルバートの供試体実験^{1), 2)}で多く用いられた部材厚（覆工厚）300mmの平版（996mm×2500mm×300mm、コンクリート設計基準強度40N/mm²）を用い、2枚を組合せることで、継手をモデル化した。接続した平版を自重の影響がキャンセルされるように横置きし、単純支承の架台上にセットして載荷を行った。なお、部材の下面にはテフロンシートを敷き摩擦の低減を

している。

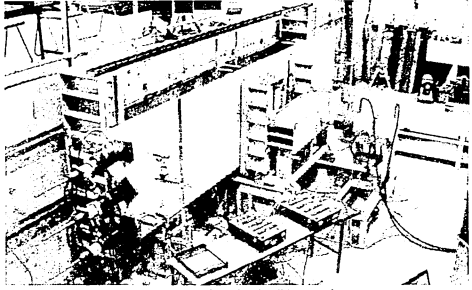


図-5 実験全景写真

実験のパラメータは継手間に作用する軸力を900kNと0.0kN、曲げの作用する方向を正負の合計4種類とした。正曲げ、負曲げの概要は図-6、図-7に示す。正曲げは主に偏土圧や側方荷重が大きい時に、負曲げは鉛直荷重が大きい時に発生する。

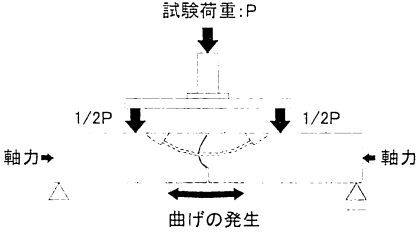


図-6 実験概要図（正曲げ）

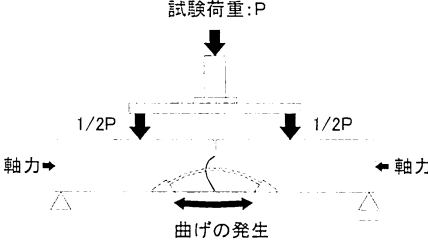


図-7 実験概要図（負曲げ）

継手間の軸力は、部材軸方向へシース管を通し、PC鋼材にてプレストレスを与えることで作用させた。なお、継手間軸力900kNはモデルケースとなった2車線トンネルを対象とした2ヒンジ式アーチが常時荷重を受ける際に継手に発生する軸力値を丸めたものである²⁾。

なお、軸力0.0kNの試験において、左右の供試体をセッティングで引付けるために、継手間に少量のプレストレス(30kN)を与えている。

実際の試験体は正負両方ともスパンL=4.715mの単純梁、載荷荷重Pを荷重裁荷幅b=1.30mに1/2Pづつ作用させる。継手が剛結合の場合、スパン中央に発生する曲げモーメントMおよびたわみδの計算式は以下となる。式中のEは弾性係数、Iは断面二次モーメントである。

$$M = \frac{1}{4} \times P \cdot (L - b) \quad (1)$$

$$\delta = \frac{M}{6EI} \times \left(-\frac{3}{4}L^2 + \frac{(L-b)^2}{4} \right) \quad (2)$$

(2) 計測

荷重による変位は図-8、図-9に示すスパン中央と

なる継手の折れ角の位置で計測を行った。

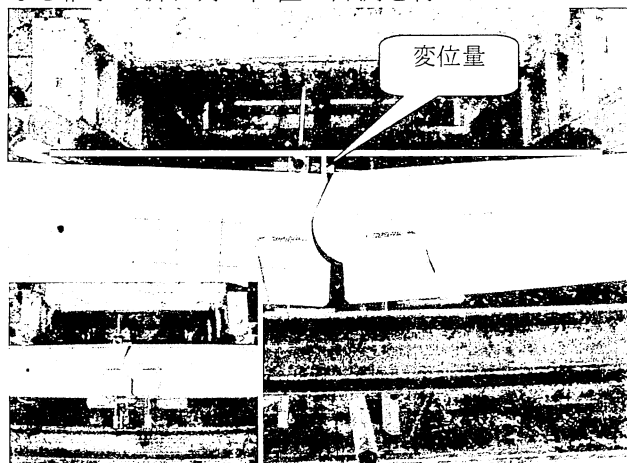


図-8 正曲げ載荷完了時写真 (左下の写真は実験前)

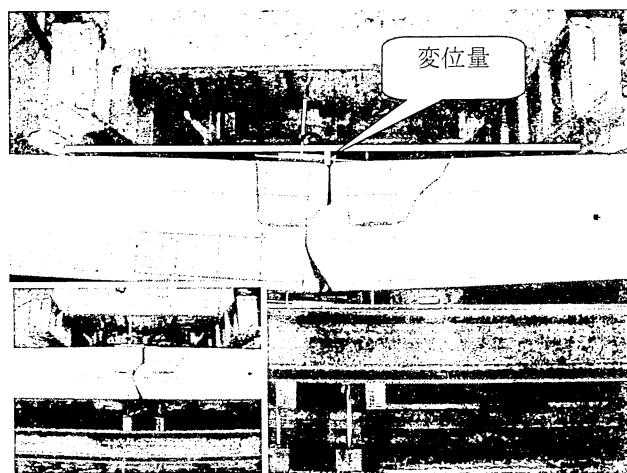


図-9 負曲げ載荷完了時写真 (左下の写真は実験前)

また、継手回転角度を求めるため、図-10の計測も行った。なお、継手の回転中心位置が明確でないこと、RC構造であるが、メタル構造のような機械的な回転も考えられるため、回転角の算出はシールドセグメントトンネルで用いられているRC構造の場合(表中 θ_1 、この場合の中立軸Xはナックルの中心線位置とした)とメタル構造の場合(表中 θ_2)の2種類算出できるようにした⁴⁾。回転中心位置の考え方は図-11に示す。

(3) 供試体寸法

実験供試体の詳細寸法などは次ページの図-12、図-13に示す。曲がりボルトは正曲げが載荷側、負曲げは載荷反対側にセットされている。

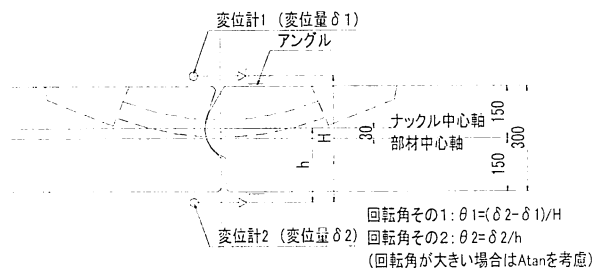


図-10 回転角計測寸法位置

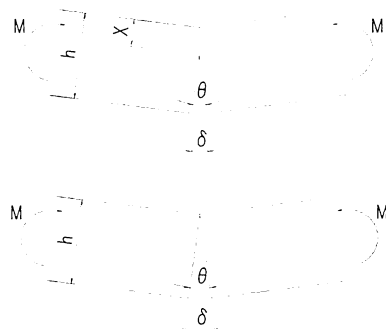


図-11 継手の回転中心(上はRC構造、下はメタル構造)

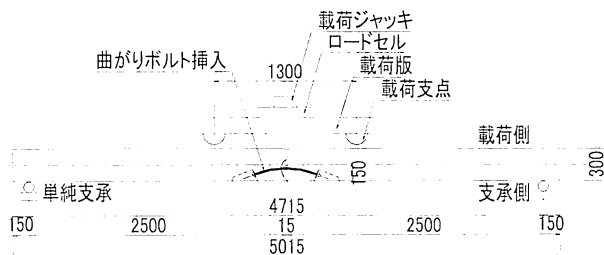


図-12 正曲げ実験載荷寸法図

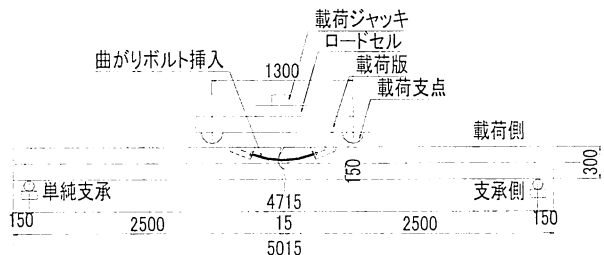


図-13 負曲げ実験載荷寸法図

4. 実験結果

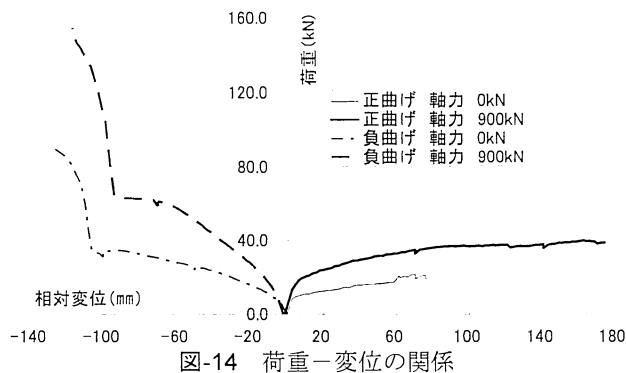
(1) 荷重－変位の関係

実験で求められたスパン中央位置の変位量をX軸、荷重をY軸に取り、その関係を図-14に示す。変位量のプラスが正曲げ、マイナスが負曲げ実験での値である。

正曲げ軸力0.0kNでの最終変位量がグラフでは76mmとなっているが、試験中に自動計測器にエラーが生じたためであり、最終的に直接テープにて計測した結果、120mm程度の変位が観測された。この値を正とした場合、実験の最終値は、正曲げ軸力0.0kNが荷重20.9kN、変位120mm、正曲げ900kNが荷重39.9kN、変位163mm。負曲げ0.0kNが変位34.0kN、変位106mm、900kNが荷重63.1kN、変位92mmであった。

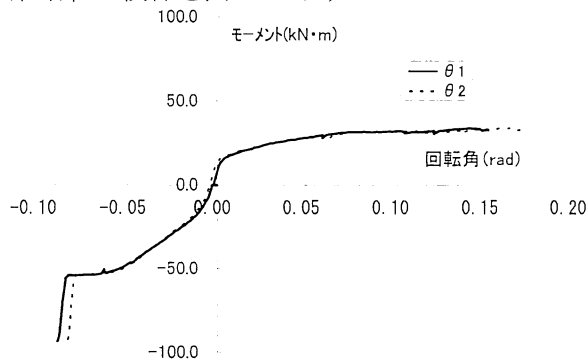
負曲げは変位量106mmと92mmにおいて、急に剛性が高くなる。これはナックルジョイントが閉じたために起きた現象である。正曲げについては閉合が生じず、剛性の上昇は見られなかった。

ちなみに継手が剛接合のとき、たわみの理論式では荷重が $P=100\text{kN}$ のときの変位量はわずか約3mm程度である。この数字の比較からでも継手の剛性はかなり小さいことがうかがえる。



(2) モーメント-回転角の関係

式(1)および計測結果から算出したモーメント-回転各位の関係を図-15に示す。



なお、継手の回転中心の違いから、回転角度 θ_1 と θ_2 の2種類算出したが、実験の精度を考慮すると、その数値差がほぼ無い状態であった。試験中の観察より、回転はナックル頂点付近が中心と確認できたため、以後の解析は回転中心位置をナックルの頂点とした θ_1 で行った。

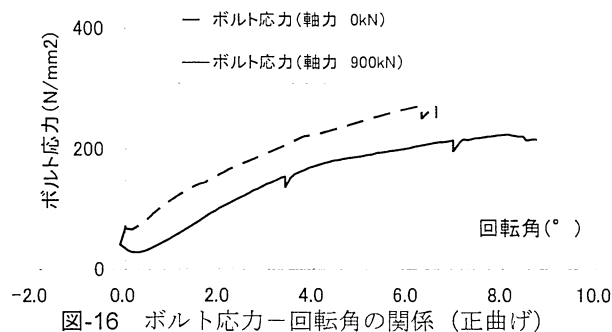
また、過去に行ったシミュレーションにおいて、レベル2地震動で継手に生じる回転角は3度程度(0.05rad、ちなみに負曲げの閉合回転角は約0.08rad)と確認している¹²⁾。実験回転角がその値をクリアしていることが確認できる。

(3) 曲がりボルト位置でのクラックの発生

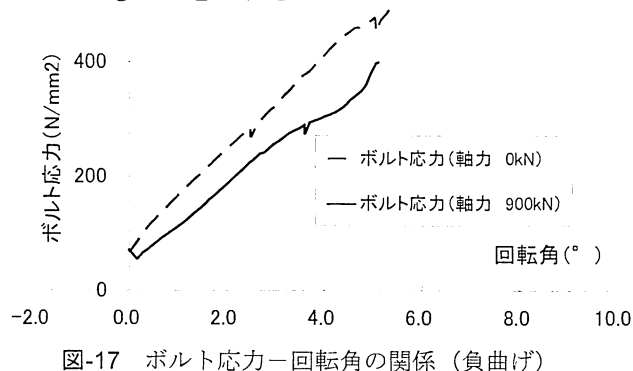
供試体側面の曲がりボルトが配置されている位置へ载荷中にクラックが発生した。正曲げ負曲げに関係なく、ボルトのかぶりが薄い方の面、正曲げは支承側、負曲げは载荷側へボルト軸に沿った形で発生した。発生確認は目視であり、以下の数値は厳密なわけではないが、その時の継手回転角度は正曲げで2.43度(0.042rad)、負曲げで2.68度(0.047rad)であった。

(4) 曲がりボルトの引張応力

曲がりボルトに生じる引張応力の関係を図-16、図-17に示す。正曲げは応力が一旦下がっている事が特徴的である。正曲げ軸力900kNは回転角0.24度(0.004rad)で上昇に転じている。



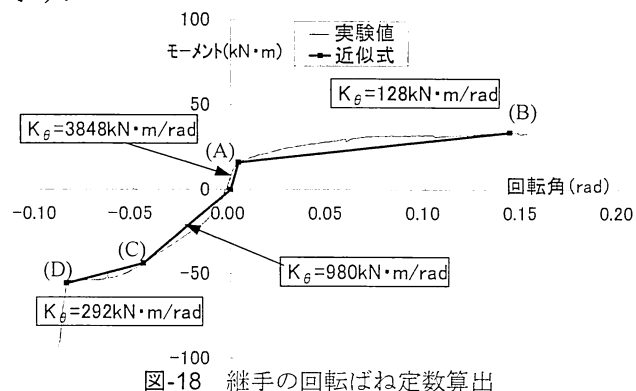
軸力900kNの負曲げの場合も、初期の段階で一時応力が減少しているが、これは供試体のなじみなどで生じたものと思われる。



5. 回転ばね定数の算出

実験値を用いたシミュレーションを行うため、継手剛性の高い軸力900kNのデータの载荷荷重(曲げモーメント)と継手に発生した回転角度から回転ばね定数を求める。

求められた曲げモーメント-回転角の関係からバイリニア型のグラフを作成し、その勾配を回転ばね定数とした。バイリニアの折れ点は、正曲げは曲がりボルトの応力が下降から上昇に向かう点(A、回転角0.004rad)と荷重が最大となる点(B、回転角0.14rad)、負曲げは曲がりボルト位置にクラックが生じた点(C、回転角0.05rad)およびナックルが閉合した点(D、回転角0.085rad)とした。その点をグラフに落とし結んだ直線を採用した。グラフを図-18に示す。



6. モデルケースの解析

継手をヒンジとしている現在の設計モデルの妥当性を検証するため、2ヒンジ式アーチの実際のモデルに実験で得られた回転ばね定数を代入しての解析を行った。設計断面を図-18に示す。

検討は継手をヒンジとした場合（回転ばね定数 $k_{\theta}=0$ ）、剛結合の場合（回転ばね定数 $k_{\theta}=\infty$ ）、実験で得られた値（回転ばね定数 $k_{\theta}=128\sim3848\text{kN}\cdot\text{m/rad}$ ）の3ケースと比較する。

トンネルのモデルは良質な地盤（ $N=30$ ）の上に構築され、周辺を盛土（ $N=5$ ，単位重量 $\gamma=18\text{kN/m}^3$ ）で埋戻された土かぶり5mの2車線車道用の断面²⁾を想定した。2ヒンジ式アーチは基礎フーチングおよびナックル下の側壁が地盤ばねで支持されている³⁾。地盤ばね値の算出は道路橋示方書IVにもとづき算出した。その時の基礎地盤の鉛直地盤反力係数は 36280kN/m^2 ，せん断地盤反力係数は 12093kN/m^2 ，埋戻土の反力係数は 3510kN/m^2 となった。また，路面荷重として 10kN/m^2 の等分布荷重を考慮し，ボルト全幅に作用させた。

なお，解析には部材間の回転ばねを考慮でき，シールドセグメントで実績のある「SIGMA R1.1」を使用した。

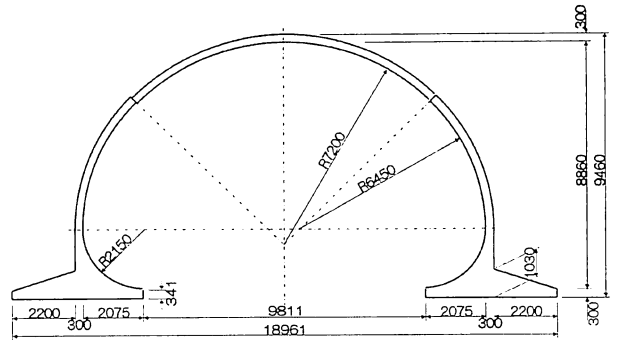


図-19 モデルケース断面

解析結果を図-20に示す。得られた断面力を比較すると，実験値での値は継手をヒンジにした場合とほぼ変わらない結果（最大で+4%程度）であり，かつ継手をヒンジにて解析した断面力が最も安全側の検討であった。

	ピン ($k_{\theta} = 0$) 	実験値 ($k_{\theta} = 128\sim3848\text{kN}\cdot\text{m/rad}$) 	剛 ($k_{\theta} = \infty$)
継手部剛性			
曲げモーメント($\text{kN}\cdot\text{m}$)			
(頂版/側壁)比率	(100/100)	(94/100)	(64/103)
軸力(kN)			
(継手部)比率	(100)	(100)	(98)
せん断力(kN)			
(継手部/側壁)比率	(100/100)	(104/100)	(132/102)

図-20 継手の回転ばね定数算出

7. おわりに

今回の実験および報告書は継手の静的性能というあくまで基礎的な要素からの考察であり，2ヒンジ式アーチの継手に関わるすべての現象を網羅できる

ものではないという条件下において，継手には若干の回転剛性が存在するが，その値は小さく，ヒンジとして考える現在の設計モデルと比べ無視しても問題ない程度であることを確認することができた。

今後の課題として，動的な性能，特に地震時のよ

うな正負繰り返し荷重を受けた際の挙動がどのようなものであるかを確認することが挙げられる。

謝辞：本実験を行うにあたり、日本ヒュームの岩崎氏、日本コンクリート工業の小野氏には多くの助言を頂きました。ここにお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木研究センター：モジュラーチ工法の耐震性向上に関する研究委員会報告書，1996.5
- 2) 土木研究センター：モジュラーチ工法の耐震性向上に関する研究委員会報告書（その2），1997.3
- 3) 地域地盤環境研究所，モジュラーチ工法協会：Modularch 技術マニュアル，2008.7
- 4) 先端建設技術センター：内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き，平成 1999.3

A EXPERIMENTAL REPORT ON CONNECTION PERFORMANCE OF 2-HINGED ARCH CULVERT

Shinichi KUBOTA, Hiroyuki OHMURA, Susumu INOUE, Makoto KIMURA and Kiyoshi KISHIDA

2-hinged arch culverts have used about road tunnels for better landscape, labor saving, reduction in construction time. Large sectional structure must be made connections and it is important that how are the connection performance evaluated. 2-hinged arch culvert are designed by hinged. But the rotation performance of connection on individual have were not confirmed. So experimentation were attempted to confirm the rotation performance. The experiment were used full-scale specimen worked connection made straight beam. Rotation performance of connection were analyzed into the data of load, displacement and rotation angle what were guided from connection of specimen gotten bending roads. And proper of design method considered that connection performance is hinged were conformed by the data.